

# **VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ - TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA**

17. listopadu 15, Ostrava Poruba, 708 33

Hornicko-geologická fakulta

Institut geoinformatiky

## **FINALIZÁCIA A OPTIMALIZÁCIA AUTOMATIZOVANÉHO SPRACOVANIA GNSS METEOROLÓGIE**

bakalárska práca

Autor :

**Marcel Poláček**

Vedúci bakalárskej práce:

**Ing. Michal Kačmařík, Ph.D.**

Študijný program:

Geodézia a kartografia

Študijný obor:

Geoinformatika

Ostrava, 2013

## Prehlásenie

Celú bakalársku prácu vrátane príloh, som vypracoval samostatne a uviedol som všetky použité podklady a literatúru.

Bol som oboznámený s tým, že na moju bakalársku prácu sa plne vzťahuje zákon č.121/2000 Sb - autorský zákon, najmä §

35 – využitie diela v rámci občianskych a náboženských obradov, v rámci školských predstavení a využitie diela školského a § 60 – školské dielo.

Beriem na vedomie, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (ďalej len VŠB - TUO) má právo nezárobkovo, ku svojej vnútornej potrebe, bakalársku prácu použiť (§ 35 odst. 3).

Súhlasím s tým, že jeden výtlačok bakalárskej práce bude uložený v ústrednej knižnici VŠB - TUO k prezenčnému nahliadnutiu a jeden výtlačok bude uložený u vedúceho bakalárskej práce.

Súhlasím s tým, že údaje o bakalárskej práci, obsiahnuté v Zázname o záverečnej práci, umiestnené v prílohe mojej bakalárskej práce, budú zverejnené v informačnom systéme VŠB - TUO.

Súhlasím s tým, že bakalárska práca je licencovaná pod Creative Commons Attribution - NonCommercial - ShareAlike 3.0 Unported licenciou. Pre zobrazenie kópie tejto licencie, je možné navštíviť <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/>.

Bolo dojednané, že s VŠB - TUO, v prípade záujmu o komerčné využitie z jej strany, uzavriem licenčnú zmluvu s oprávnením použiť dielo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.

Bolo dojednané, že použiť svoje dielo - bakalársku prácu alebo poskytnúť licenciu k jej komerčnému využitiu môžem len so súhlasom VŠB - TUO, ktorá je oprávnená v takom prípade odomňa požadovať primeraný príspevok na úhradu nákladov, ktoré boli VŠB - TUO na vytvorenie diela vynaložené (až do ich skutočnej výšky).

V Ostrave dňa

Marcel Poláček

## **Pod'akovanie**

Na tomto mieste by som chcel poďakovať všetkým, ktorý mi pomohli pri vypracovaní bakalárskej práce a to najmä pánovi Ing. Michalovi Kačmaříkovi, Ph.D. za pripomienky a cenné podnety počas konzultácií mojej práce a pánovi Ing. Janovi Růžičkovi, Ph.D. za pomoc pri inštalácii programového vybavenia Bernese.

## **Abstrakt**

Bakalárska práca sa venuje problematike automatizácie v oblasti GNNS meteorológie; konkrétne výpočtu obsahu vodných pár v atmosfére nad sieťou vybraných referenčných staníc, ktoré sú umiestnené na území Českej republiky a okolitých štátoch. Hodnota obsahu vodných pár je stanovená vo vertikálnom premete nad každou referenčnou stanicou v hodinových intervaloch. Cieľom tejto práce bolo automatizovať a zjednodušiť tak proces výpočtu hodnôt obsahu vodných pár na základe GNNS meraní.

Kľúčové slová:

GNNS meteorológia, obsah vodných pár v atmosfére, automatizácia

## **Abstract**

Thesis presents optimization process of evaluating results obtained from GNNS measurements in a meteorology. Atmospheric content of water vapours was measured over a network of selected stations in Czech Republic as well as neighbouring countries. Data were recorded in vertical view in hourly intervals. We aimed to simplify and automate process for calculation of GNNS based data of water vapor content.

Keywords:

GNSS meteorology, precipitable water vapour, automation

# Obsah

1.Úvod.....	13
2.Ciele práce.....	14
3.GNNS.....	15
3.1Princíp družicového určovania polohy.....	16
3.1.1.Určovanie polohy na základe Dopplerovských meraní.....	16
3.1.2.Určovanie polohy na základe meraní vzdialeností.....	17
3.1.3.Určovanie polohy pomocou fázových meraní.....	18
3.2Všeobecná štruktúra družicových navigačných systémov.....	19
3.2.1.Kozmický segment.....	19
3.2.2.Riadiaci segment.....	19
3.2.3.Užívateľský segment.....	20
3.3Systémy družicovej navigácie.....	21
3.3.1.GPS - NAVSTAR.....	21
3.3.2.GLONASS.....	24
3.3.3.GALILEO.....	25
3.4Referenčné stanice GNSS.....	26
3.5Faktory ovplyvňujúce kvalitu merania.....	26
3.5.1.Platnosť a presnosť efemeríd.....	26
3.5.2.Vplyv atmosféry na kvalitu merania.....	27
3.5.3.Presnosť hodín na družiciach.....	28

3.5.4. Viacnásobné šírenie signálu (multipath).....	28
3.5.5. Ďalšie faktory ovplyvňujúce kvalitu merania.....	28
4. GNSS meteorológia.....	30
4.1 Obsah vodných pár v atmosfére.....	30
4.2 Metódy získavania obsahu vodných pár v atmosfére.....	32
4.2.1. Meteorologická rádisonda.....	32
4.2.2. Určovanie obsahu vodných pár pomocou družíc diaľkového prieskumu Zeme .....	33
4.2.3. Vysokofrekvenčný mikrovlnný rádiometer .....	33
4.2.4. Určovanie obsahu vodných pár na základe GNSS meraní.....	33
5. Automatizované spracovanie výpočtu obsahu vodných pár v atmosfére.....	37
5.1 Dáta vstupujúce do automatizovaného spracovania.....	38
5.1.1. RINEX súbory.....	38
5.1.2. Súbory typu *.EPH.....	39
5.1.3. Súbory typu *.ERP.....	39
5.1.4. Súbory typu *.CLK.....	39
5.1.5. Súbory typu *.ION .....	39
6. Zoznámenie sa s vytvoreným riešením takmer automatizovaného spracovania .....	40
7. Optimalizácia a realizácia novej automatizácie výpočtu obsahu vodných par v atmosfére .....	41
7.1.1. Jednotlivé kroky automatizácie.....	42
7.1.2. Inštalácia na server.....	45
8. Súčasný stav riešenia problematiky spracovania v blízkom reálnom čase.....	46
9. Záver.....	47

## 1. Úvod

V bakalárskej práci sa pokúsime čiastočne doplniť diplomovú prácu pojednávajúcu o problematike GNSS meteorológie Ing. Michala Kačmaříka, Ph. D. z roku 2009. GNSS meteorológia je perspektívna alternatíva k používaným metódam získavania informácií o stave atmosféry. Na základe uvedenej práce sa pokúsime vytvoriť plne automatizovaný systém pre získavanie hodnôt obsahu vodných pár z atmosféry. Hlavnou požiadavkou tohto systému je dostupnosť kontinuálnych a aktuálnych hodnôt obsahu vodných pár v atmosfére pre sieť zvolených referenčných staníc.

## 2. Ciele práce

1. Zoznámenie sa s oblasťou GNSS meteorológie.
2. Zoznámenie sa s vytvoreným riešením takmer automatizovaného spracovania.
3. Finalizácia automatizovaného spracovania výpočtu obsahu vodných pár v atmosfére.
4. Návrh optimalizácie finalizovaného procesu spracovania a prípadná realizácia tejto optimalizácie.

Náplňou prvého bodu je popis samotnej problematiky GNSS meteorológie, ktorý obsahuje základné princípy a postupy získavania informácií o stave atmosféry s využitím GNSS meraní.

Druhý bod popisuje súčasné riešenie automatizovaného výpočtu celkového oneskorenia signálu (ZTD). Ďalej dochádza k popisu nedostatkov daného riešenia ZTD a návrhu zmien.

Pri následnom spracovaní problematiky riešenia došlo k tematickému spojeniu záverečných dvoch bodov. Popisujú realizáciu a optimalizáciu finálneho spracovania výpočtu obsahu vodných pár v atmosfére.



### 3. GNNS

V tejto kapitole upriamime našu pozornosť na problematiku GNNS. Pri písaní tejto kapitoly sme vychádzali z prác (Hrdina et al., 1996), (Rapant P., 2002) a materiálov Ing. Dávida Vojtku, PhD (<http://gis.vsb.cz/vojtek/index.php?page=gnps/prednasky>).

GNSS (global navigation satellite system) u nás tiež známe ako GDPS (globálny družicový polohový systém) je všeobecné označenie pre družicové určovanie polohy a navigácie.

*„Družicový navigačný systém patrí k takzvaným GNPS (globálny navigačný polohový systém), teda k systémom, ktoré sú schopné s obmedzeným počtom rádio-majákov zaistiť pokrytie celého zemského povrchu navigačnými signálmi a umožňujú tak určovať polohu kdekoľvek na Zemi. Hlavnou výhodou týchto systémov je, že umožňujú určovať polohu v jednotnom súradnicovom systéme spoločnom pre celú zemeguľu. Tieto systémy bežne pracujú 24 hodín denne, bez ohľadu na počasie alebo ročnú dobu“ (Hrdina et al., 1996).*

História GNSS siaha do päťdesiatych rokov 20. storočia. V roku 1957 bola vypustená prvá umelá družica zeme - Sputnik 1. ZSSR vyslalo družicu za účelom skúmania vplyvu ionosféry na šírenie a pohlcovanie rádiových vln a taktiež sledovania parametrov obežnej dráhy danej družice. Družica vysielala pulzné telegrafické signály o dĺžke 0,2 a 0,6 sekundy. Počas letu sovietskej družice prebiehal aj výskum americkej univerzity - Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory, ktorá skúmala diferenciu signálu vzhľadom na jeho polohu. Približovaním Sputnika k meracej stanici sa frekvencia signálu postupne zvyšovala. Naopak, vzdďaľovaním družice sa frekvencia signálu znižovala – jedná sa o tzv. Dopplerov efekt.

V tomto období sa objavili prvé otázky ohľadom problematiky GNNS:

1. Je možné pozorovaním z viacerých staníc určiť polohu družice využitím tzv. Dopplerovho efektu?
2. Je možné podľa známych súradníc družíc určiť polohu stanice?

Nové zistenia následne viedli v roku 1964 k vytvoreniu prvého družicového navigačného

systému, známeho pod názvom Transit.

V nasledujúcej podkapitole sa budeme bližšie venovať princípu družicového určovania polohy.

### **3.1 Princíp družicového určovania polohy**

Určovanie polohy objektu pomocou družíc patrí k tzv. nepriamym metódam. Dôvodom je skutočnosť, že poloha objektu sa určuje vyhodnotením iných veličín ako sú geografické súradnice. Počas lokalizácie objektu sa využívajú rádiové vlny vysielané z družíc, ktorých poloha je nám známa, respektíve poznáme ich obežnú dráhu. Na samotné určenie polohy sa používajú tri metódy, ktoré rozlišujeme podľa typu vysielaného signálu a jeho použitia:

1. metóda Dopplerovská
2. metóda diaľkomerná (kódová)
3. metóda založená na nosnej vlne (fázová)

*„Tieto metódy umožňujú určovať polohu prijímača v dvoj- prípadne troj-rozmernom priestore. Základným predpokladom však je, že prijímateľ pozná presnú polohu rádio-majákov (družíc)“ (Rapant P., 2002).*

V kontexte metód určovania polohy objektov sa budeme v nastávajúcich podkapitolách bližšie venovať jednotlivým metódam.

#### **3.1.1. Určovanie polohy na základe Dopplerovských meraní**

Určovanie polohy na základe Dopplerovských meraní patrilo medzi prvé používané metódy pri družicovej navigácii. Meranie vychádza z Dopplerovského javu, ktorý spočíva v zmene frekvencie vysielaného signálu z pohybujúceho sa objektu. Metóda družicovej navigácie je založená na Dopplerovskom posune frekvencie v dôsledku relatívneho pohybu družíc voči prijímaču. Družica vysiela signál o známej konštantnej frekvencii ( $f_v$ ). Na tomto signále sú prenášané časové značky a parametre obežnej dráhy družice, ktoré umožňujú z prijímača vypočítať presnú polohu družice v čase merania. Prijímač je schopný na základe frekvencie prijímaného signálu ( $f_p$ ), polohy družice a signálu oscilátoru

prijímača s frekvenciou  $f_0$  vypočítať polohu meraného bodu pomocou opakovaných meraní. Meniace sa hodnoty frekvencie signálu družice, v závislosti na čase, zobrazuje Dopplerová krivka, ktorá je vždy originálna pre hľadanú polohu družice.

### 3.1.2. Určovanie polohy na základe meraní vzdialeností

Systémy, ktoré určujú polohu na základe merania vzdialenosti medzi družicou a navigačným prijímačom nazývame diaľkomerné. Táto vzdialenosť medzi vysielateľom (družicou) a prijímačom sa nazýva pseudovzdialenosť. Termín pseudovzdialenosť sa zavádza pretože, výsledný čas šírenia signálu od družice k prijímaču je ovplyvnený mnohými faktormi a chybami. Vzhľadom k týmto faktorom určená pseudovzdialenosť neodpovedá skutočnej vzdialenosti družice od prijímača. Ich vzájomná pseudovzdialenosť vychádza z času  $t$ , potrebného k šíreniu signálu od družice k užívateľovi a rýchlosti šírenia rádiových vĺn (rovnej rýchlosti svetla  $c$ ). Ak sú nám známe súradnice družíc ( $x_i, y_i, z_i$ ) môžeme určiť polohu užívateľa ( $x, y, z$ ) riešením troch rovníc o troch neznámych:

$$\sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2 + (z_1 - z)^2} = t_1 * c \quad (1)$$

$$\sqrt{(x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2 + (z_2 - z)^2} = t_2 * c$$

$$\sqrt{(x_3 - x)^2 + (y_3 - y)^2 + (z_3 - z)^2} = t_3 * c$$

Diaľkomerné signály jednotlivých družíc musia byť medzi sebou nezameniteľné. Nezmeniteľnosť signálov družíc sa dosahuje troma rôznymi spôsobmi:

- **frekvenčné delenie** (FDMA) – každá z viditeľných družíc používa na prenos signálu inú frekvenciu nosnej vlny
- **kódové delenie** (CDMA) – všetky družice vysielajú signál na rovnakej frekvencii, ale diaľkomerný kód je pre každú družicu odlišný
- **časové delenie** – všetky družice systému vysielajú rovnaký kód na rovnakej frekvencii, ale v presne definovaných časových úsekoch.

Ďiaľkomerné systémy sa ešte delia na aktívne a pasívne.

Uvediem aspoň základné informácie o pasívnych systémoch, ktoré sa využívajú v

rámci družicovej navigácie. Družice vysielajú signály, ktoré obsahujú diaľkomerné kódy, spolu s časovými značkami a údajmi o obežných dráhach družíc. Pomocou časovej značky navigačný prijímač určí kedy bola daná čas signálu z družice odoslaná. Prijímač následne meria časový interval  $t$ , ktorý uplynie medzi odoslaním a prijatím signálu, z ktorého vzápätí navigačný prijímač vypočíta vzdialenosť od družice. Pre určenie polohy pomocou pasívnych diaľkomerných systémov je nevyhnutné prijímať signál minimálne od štyroch družíc súčasne, pretože družice a užívateľ nemajú úplne zosynchronizovaný čas. Preto pri meraní času  $t$  dochádza k posunu o neznámy časový interval  $\Delta t$ . Z toho dôvodu, pribúda k neznámym súradniciam užívateľa ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ) štvrtá neznáma  $\Delta t$ . Preto je pre presné určenie polohy, nevyhnutné vychádzať zo štyroch rovníc o štyroch neznámých.

$$\sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2} = (t_i + \Delta t) * c \quad \text{kde } i = 1, 2, 3, 4 \quad (2)$$

Kódové merania majú niekoľko výhod čo z nich v súčasnosti robí najpoužívanějšíe metódy určovania polohy. Medzi výhody patrí:

- rýchle určenie polohy
- odolnosť voči rušivým vplyvom prostredia
- po chvíľkovej strate signálu rýchle opätovné získanie polohy

### 3.1.3. Určovanie polohy pomocou fázových meraní

Určovanie polohy na základe fázových meraní vychádza z vlnovej dĺžky  $\lambda$  nosnej vlny. Vzdialenosť medzi družicou a prijímačom vypočítame takým spôsobom, že známy počet vlnových dĺžok medzi družicou a prijímačom vynásobíme vlnovou dĺžkou nosnej vlny a následne pripočítame desatinný zbytok. Teoreticky, jedná sa o princíp relatívne jednoduchý; konkrétna realizácia je však komplikovanejšia. V prípade zisťovania desatinného zostatku vlnovej dĺžky sa nejedná o problémový úkon. Zatiaľčo určovanie celočíselného počtu vlnových dĺžok ( $N$ ) je omnoho zložitejším procesom (anglické označenie – ambiguity, v preklade nejednoznačnosť). Určovanie celočíselného počtu vlnových dĺžok ( $N$ ) je časovo i výpočtovo náročný proces, ktorý si vyžaduje dlhšiu observáciu na jednom mieste. V prípade akéhokoľvek prerušenia signálu je  $N$  stratené. Výpočet polohy musí následne prebiehať od začiatku. Pomocou popísanej metódy je

možné vymedziť pseudovzdialenosť prijímača (užívateľa) od družice s presnosťou na niekoľko milimetrov.

Za súčasnej štruktúry diaľkomerných (kódových) signálov nie je možné dosiahnuť presnosť fázových meraní. Výhody (presnosť v určovaní polohy) aj nevýhody tejto metódy (napr. dlhá observácia, zložité prístroje,...) predurčujú tento postup najmä na geodetické merania.

### **3.2 Všeobecná štruktúra družicových navigačných systémov**

Družicové navigačné systémy sú tvorené tromi nosnými segmentami:

- kozmický segment
- riadiaci segment
- užívateľský segment

Stručnému popisu uvedených segmentov sa venujeme v nasledovných podkapitolách.

#### **3.2.1.Kozmický segment**

Kozmický segment tvorí sústava družíc Zeme, ktoré obiehajú po známych a definovaných obežných dráhach. Kozmický segment je určený:

- typom obežných dráh (kruhové, eliptické a geostacionárne)
- výškou, sklonom a počtom obežných dráh
- počtom a rozmiestnením družíc na obežných dráhach

#### **3.2.2.Riadiaci segment**

Riadiaci segment sa skladá zo sady pozemných staníc, ktoré môžeme rozdeliť do troch hlavných kategórií podľa stanovených úloh.

**Hlavné riadiace stanice** – spravidla je len jedna ( + jedna záložná). Ich úlohou je:

- plánovanie
- generovanie navigačných správ
- údržba a „zdravotný“ stav družíc
- generovanie dát pre procesor družíc
- riadenie synchronizácie konštalácie družíc
- vyhodnocovanie stavu a výkonu systému

**Monitorovacie stanice** - sú rozmiestnené tak, aby družice boli neustále viditeľné z dvoch až troch staníc súčasne. Ich náplňou je:

- sledovanie navigačných signálov
- kódové a fázové merania
- zber dát o atmosfére
- dekódovanie navigačných dát družíc

#### **Stanice pre komunikáciu**

- odosielanie príkazov družiciam
- odosielanie navigačných dát družiciam
- odosielanie dát pre procesor družíc
- zber dát telemetrie družíc

### **3.2.3. Užívateľský segment**

Užívateľský segment družicových navigačných systémov pozostáva z prijímačov navigačných signálov, ktoré je možné podľa technologickej konštrukcie a triedy presnosti rozdeliť do mnoho kategórií.

## **3.3 Systémy družicovej navigácie**

V uvedenej kapitole je našim cieľom podať stručný popis vybraných globálnych

navigačných družicových systémov. Vychádzajúc z histórie, vôbec prvým funkčným družicovým navigačným systémom bol systém TRANSIT, ktorý pracoval na Dopplerovskom efekte. Americké námorníctvo neskôr prišlo s novým systémom TIMATION, ktorého družice vysielali diaľkomerný kód ako prvé. Navyše, družice niesli na palube atómové hodiny.

Následne sa budeme venovať popisu systémov, ktoré sú v súčasnosti používané, respektíve budú používané v blízkej budúcnosti.

### **3.3.1. GPS - NAVSTAR**

Väčšina laickej verejnosti si pod pojmom GPS predstaví súhrnný názov pre svetové satelitné navigačné systémy, čo však nie je úplná pravda. Systém GPS (Global Positioning System) má oficiálny názov NAVSTAR (Navigation System using Time And Range) vznikol ako projekt v roku 1973 v USA spojením projektu TIMATION a projektu Air Force Project s názvom 621B. Systém GPS bol primárne určený pre potreby americkej armády.

GPS je v súčasnosti najpoužívanější systém družicovej navigácie vo svete. Plná operačná spôsobilosť systému bola dosiahnutá v roku 1995.

Kozmický segment systému GPS sa skladá z dvadsiatich štyroch družíc na šiestich orbitálnych rovinách s rozstupmi  $60^\circ$ . Na každej obežnej rovine sú umiestnené štyri družice (plus 1-2 záložné). Obežné dráhy sa nachádzajú vo výške 20200 km nad Zemou. Obežný čas družíc GPS okolo Zeme je 11 hodín 58 minút. Toto rozmiestnenie zaručuje stopercentné pokrytie zemského povrchu, navyše 3000 km nad zemou. Signál je v každom čase a na každom bode zemského povrchu dostupný zo šiestich až trinástich družíc. Inklinácia obežných dráh družíc systému GPS je  $55^\circ$ , z čoho vyplýva, že určovanie polohy v zemepisných šírkach väčších ako  $55^\circ$  je zaťažené chybou určovania polohy z geometrie družíc. (<http://tycho.usno.navy.mil/gpscurr.html>, 4.4.2013)

Riadiaci segment pozostáva z troch všeobecných typov staníc (viď kapitola č. 4. 3. 2. Riadiaci segment). Monitorovacie stanice sú samoobslužné, t. j. diaľkovo riadené z hlavnej riadiacej stanice. Stanice sú rozmiestnené takým spôsobom, že každá družica je viditeľná z

dvoch až troch staníc súčasne. Hlavná riadiaca stanica sa nachádza v Colorado Springs. Hlavná stanica vypočítava presný GPS čas vzhľadom k UTC času. Pri výpočte používa priemerovanie času z dvanástich céziových a dvanástich hydrogénových hodín. Jej ďalšou úlohou je zostavovať obsahy navigačných správ. Hlavná stanica odovzdáva obsahy navigačných správ, spolu s presným GPS časom, komunikačným staniciam, ktoré ich nahrávajú na družice jeden až trikrát denne.

Samotný navigačný signál družíc GPS je kombináciou troch častí:

- nosnej vlny,
- diaľkomerného kódu,
- navigačnej správy.

Všetky zložky signálu sú odvodené násobením a delením základnej frekvencie  $f_0$ , ktorá má hodnotu 10,23 MHz. Frekvencia  $f_0$  je odvodená z oscilačnej frekvencie atómových hodín. Družicové hodiny sú na Zemi nastavené na frekvenciu 10,22999999543 MHz, z dôvodu eliminovania relativistických javov. Systém GPS používal do nedávna dve nosné frekvencie L1 (1 575,42 MHz) a L2 (1 227,6 MHz). V neskoršom období k nim pribudla tretia nosná frekvencia L5 (1 176,45 MHz). Uvedené frekvencie slúžia na prenos diaľkomerných kódov a navigačných správ.

Družice GPS poskytujú niekoľko typov diaľkomerných kódov. Diaľkomerný kód C/A (Coarse/Acquisition) je vysielaný na frekvencii L1. Ide o krátky a pomalý kód. C/A kód je základom pre štandardnú polohovú službu (SPS), ktorá je určená pre civilné, komerčné a výskumné použitie. C/A kód je prístupný všetkým neautorizovaným užívateľom zadarmo. Jeho nevýhodou je, že je hrubý a nepresný. Primárnou úlohou C/A kódu je sprístupnenie P(Y) kódu pre autorizovaných užívateľov.

Diaľkomerný kód P (Y) (Precise) je modulovaný na dvoch frekvenciách L1 a L2, z toho dôvodu, aby bolo možné eliminovať ionosférickú refrakciu. Kód P (Y) je dlhý a rýchly, môžeme ho označiť presný kód. P kód je šifrovaný na Y kód, z toho vyplýva názov P(Y) kód. Spomínané šifrovanie sa nazýva Anti-spoofing (A-S). Dešifrovacie rovnice sú známe len autorizovaným užívateľom (Armáda spojených štátov, plus spojenci). P(Y) kód je základom pre službu PPS (presná polohová služba). Výhodami P(Y) kódu, oproti C/A



kódu, sú najmä väčšia presnosť a možnosť eliminácie ionosférickej refrakcie pomocou prijímania diaľkomerného kódu na dvoch rozličných frekvenciách.

Diaľkomerný kód L2C pribudol k vyššie spomínaným vysielaným kódom v roku 2005 v rámci modernizácie systému, ktorý je určený pre skvalitnenie a spresnenie civilných služieb. Kód L2C je obdobou P(Y) kódu pre civilné použitie; je vysielaný na frekvencii L2. Uvedený kód je rýchlejší a dlhší oproti C/A kód. Kód L2C tvoria dve odlišné sekvencie kódu. Sekvencia CM (Civilian Moderate) je dlhá 10,230 bitov a CL (Civilian Long) má dĺžku 767,250 bitov. Spolu s diaľkomerným kódom L2C pribudol aj nový vojenský M kód, ktorý je vysielaný na oboch frekvenciách.

V deväťdesiatych rokoch 20. storočia bola do signálu GPS zavedená tzv. selektívna dostupnosť (SA), ktorá mala za úlohu znížiť presnosť merania neautorizovaným užívateľom. Išlo o zámerné zavádzanie premenlivých chýb do signálu GPS. Službu (SA) sa realizovala dvoma spôsobmi:

- zavádzaním chýb do efemeríd družíc (vedie k chybnému určeniu polohy družice)
- zavádzaním pseudonáhodnej fluktuácie frekvencie hodín na družici (rýchle chybové zmeny v určení pseudovzdialenosti)

Uvedená služba bola v roku 2000 deaktivovaná, čím bolo zaznamenané okamžité päťnásobné zlepšenie presnosti.

Ďalšou nevyhnutnou časťou naviagačného signálu je navigačná správa. Navigačná správa obsahuje:

- telemetrické údaje a časové značky
- efemeridy družice
- almanach družíc systému GPS
- opravy atómových hodín družice
- dáta pre opravu vplyvu ionosférickej refrakcie

- zašifrované WAGE dáta a vojenské správy

Signál jednotlivých družíc sa od seba odlišuje pomocou kódového delenia (CDMA). Všetky družice vysielajú signál na rovnakej frekvencii, ale ďalším kódom je pre každú družicu odlišný.

### 3.3.2. GLONASS

Systém GLONASS je navigačný družicový systém Ruskej federácie. Systém je nástupcom systému Cikada, ktorý obdobne ako Transit pracoval na Dopplerovskom meraní. Program GLONASS vznikol v roku 1976. O dvadsať rokov neskôr, systém nadobudol plnú operačnú spôsobilosť. O pár rokov neskôr, systém začal upadať z dôvodu nedostatku finančných prostriedkov. Táto skutočnosť viedla k tomu, že v roku 2001 mal systém Glonass iba šesť funkčných družíc. Neskôr však postupne dochádzalo k znovu vybudovaniu systému, ktorý od roku 2009 dosahuje stále plnej alebo takmer plnej konštalácie.

Kozmický segment systému Glonass sa skladá z 21 družíc, plus 3 záložné. Družice sa nachádzajú na troch obežných dráhach vo výške 19 130 km. Inklinačný uhol obežných dráh je  $64,8^\circ$ , to má za následok lepšie pokrytie väčších zemepisných šírok. V apríli 2013 bolo na obežných dráhach celkom 30 družíc systému Glonass; 24 z nich bolo v aktívnej prevádzke a zvyšok fungoval ako aktívna záloha (<http://glonass-iac.ru/en/GLONASS/>)

Hlavná riadiaca stanica systému Glonass sa nachádza v Krasnoznamensku, východne od Moskvy. Riadiaci segment ďalej tvorí jedenásť monitorovacích staníc, z ktorých sú niektoré zároveň určené aj pre komunikáciu s družicami.

Navigačný signál systému Glonass je obdobne ako pri systéme GPS vysielaný na viacerých nosných frekvenciách. Signál bol pôvodne vysielaný na dvoch nosných frekvenciách  $L1=1\,602\text{ MHz}$  a  $L2=1246\text{ MHz}$ . Spolu s najnovšou generáciou družíc GLONASS-K1 pribudla aj tretia frekvencia  $L3=1202,025\text{ MHz}$ . Systém Glonass využíva na identifikáciu družíc frekvenčné delenie (FDMA). Z toho vyplýva, že každá družica vysiela identický kód, ale na trochu inej frekvencii. Frekvenciu konkrétnej družice vypočítame podľa vzťahu:

$$L1=1\,602\text{ MHz} + n*0,5625\text{ MHz} \quad (3)$$

$$L2=1\,246\text{ MHz} + n*0,4375\text{ MHz}$$

kde:

$n$  sa nahradí číslom kanálu priradeného družici; nadobúda hodnoty z intervalu  $\langle -7 ; 4 \rangle$  (dve protiľahlé družice umiestnené na rovnakej orbite majú zhodné číslo kanálu).

Výhodou frekvenčného delenia je väčšia odolnosť voči rušeniu signálu medzi jednotlivými družicami. Jeho nevýhodou je následná zložitejšia konštrukcia prijímača a najmä nemožnosť kombinácie navigačných signálov Glonass s ďalšími systémami GNSS. Popísané nevýhody viedli k tomu, že družice generácie GLONASS-K1 majú už signály na frekvenciách L3 odlišené pomocou CDMA. Od generácie GLONASS-K2 sa plánuje kódové delenie aj na frekvenciách L1 a L2.

Navigačný signál systému Glonass obsahuje krátky a pomalý kód pre civilné použitie, aj dlhý a rýchly kód pre vojenské účely. Navigačná správa je podobná ako v prípade systému GPS, ale navyše obsahuje informácie o diferencii medzi časom Glonass a GPS (Kačmarík M., 2012).

### 3.3.3. GALILEO

Systém Galileo bude európsky globálny družicový navigačný systém, ktorý poskytuje navigačné služby pod civilnou kontrolou. V budúcnosti by mal systém spolupracovať so systémami GPS a Glonass. Systém Galileo má štandardne poskytovať dve frekvencie pre neautorizovaných užívateľov.

Dňa 21. októbra 2011 boli vyslané prvé dve zo štyroch družíc, ktoré mali za úlohu slúžiť k overeniu koncepcie systému Galileo, vrátane vesmírneho aj pozemného segmentu. Ďalšie dve družice ich nasledovali 12. októbra 2012. Do roku 2015 sa má dosiahnuť počiatočná operačná spôsobilosť (IOC) a následne do roku 2020 plná operačná spôsobilosť (FOC).

Kozmický segment systému Galileo má tvoriť 30 družíc (27 aktívnych a 3 záložné) na troch kruhových obežných dráhach vo výške 23 222 km a inklináčny uhol obežných dráh 56°. V momente dosiahnutia plnej operačnej spôsobilosti bude systém Galileo

poskytovať kvalitné pokrytie až v zemepisných šírkach 75° (tomu zodpovedá Severný mys v Nórsku). ([http://www.esa.int/Our\\_Activities/Navigation/The\\_future\\_-\\_Galileo/What\\_is\\_Galileo.](http://www.esa.int/Our_Activities/Navigation/The_future_-_Galileo/What_is_Galileo.), 30.3.2013 )

Systém Galileo má od začiatku vysielat' na štyroch nosných frekvenciách: E1 (1 575,42 MHz), E5a (1 176,45 MHz), E5b (1 207,14 MHz) a E6 (1 278,75 MHz). Z dôvodu zaistenia širokého pásma služieb bude zabezpečené vysielanie desiatich kódov rôznej dĺžky a rýchlosti.

### **3.4 Referenčné stanice GNSS**

Referenčné stanice sú vybavené anténou a GNSS prijímačom. Stanice sú umiestnené na bode so známymi geografickými súradnicami. Sú určené na zber dát pre definovanie diferenčných korekcií. Referenčné stanice môžu byť permanentné alebo dočasné. V našej práci budeme mať pod pojmom referenčná stanica na mysli permanentnú stanicu. Referenčná stanica môže byť vybavená tiež meteorologickými prístrojmi. Takáto stanica potom spolu s navigačnými dátami poskytuje aj dáta meteorologické. ([http://www.vugtk.cz/slovník/5891\\_referencni-stanice](http://www.vugtk.cz/slovník/5891_referencni-stanice))

### **3.5 Faktory ovplyvňujúce kvalitu merania**

Presnosť merania pomocou GNSS ovplyvňuje mnoho faktorov. Tie z nich, ktoré najvýznamnejšie vstupujú do oblasti GNSS meteorológie sa pokúsime v nasledujúcom texte popísať.

#### **3.5.1. Platnosť a presnosť efemeríd**

Efemeridy sú údaje o zdanlivých polohách pohybujúcich sa astronomických objektov na obežných dráhach. V prípade GNSS sa jedná o polohy družíc na obežných dráhach Zeme. Podľa presnosti a dostupnosti v čase možno rozlíšiť niekoľko typov efemeríd, ktoré uvádzame v tabuľke.

Efemeridy môžeme voľne získať od medzinárodnej GNSS služby (IGS), ktorá je dobrovoľná federácia viac ako 200 agentúr po celom svete. V súčasnosti poskytuje IGS

podklady pre dva systémy družicovej navigácie a to GPS a Glonass. Medzi ďalších poskytovateľov efemeríd patrí Centrum pre Určenie Orbít v Európe (CODE). CODE každý deň poskytuje presné dráhy družíc, súradnice staníc, opravy družicového času, ionosférické mapy a ďalšie podklady pre spresnenie výsledkov merania.

<b>Efemeridy</b>	<b>Presnosť poloha/čas</b>	<b>Dostupnosť</b>	<b>Zdroj</b>
vysielaná	~ 2 m / 7 ns	v reálnom čase	navigačná správa
ultra-rapid (predikcia)	~10 cm / 5 ns	v reálnom čase	IGS
ultra-rapid (výpočet)	<5 cm / 0,2 ns	po 3 hod.	IGS
rapid	< 5 cm / 0,1 ns	po 17 hod.	IGS
presná (precise)	~ 2 cm / 0,1 ns	po 12 dňoch	IGS

*Tabuľka 1: Prehľad presnosti a dostupnosti jednotlivých druhov efemeríd*

### 3.5.2. Vplyv atmosféry na kvalitu merania

Šírenie rádiových signálov najviac ovplyvňujú dve časti atmosféry: ionosféra a troposféra. Ionosféra obsahuje veľký počet ionizovaných častíc a voľných elektrónov. Tieto častice značne ovplyvňujú šírenie rádiových signálov; tento jav sa nazýva ionosférická refrakcia. Veľkosť ionosférickej refrakcie je závislá na vlnovej dĺžke signálu. Jej vplyv je možné eliminovať použitím dvoch frekvencií nosnej vlny.

Prechodom signálu cez troposféru je spôsobená troposférická refrakcia, ktorá oproti ionosférickej refrakcii, nie je závislá na vlnovej dĺžke. Nie je možné ju eliminovať meraním na dvoch frekvenciách. Troposférickú refrakciu je však možné pomerne presne

modelovať pomocou atmosférických podmienok v mieste merania ako sú: teplota, tlak a vlhkosť vzduchu.

Vplyvu atmosféry na šírenie signálu sa bližšie venujeme v kapitole 5. GNSS meteorológia.

### **3.5.3.Presnosť hodín na družiciach**

Presný čas je pre družicovú navigáciu ďalším kľúčovým faktorom. Preto podobne ako pri efemeridách inštitúcie IGS a CODE poskytujú aj súbory s korekciami hodín družíc. Tieto korekcie hodín majú rovnakú podobu ako efemeridy (ultra-rapid, rapid, precise).

### **3.5.4.Viacnásobné šírenie signálu (multipath)**

Dochádza k nemu keď navigačný prijímač spracováva okrem priameho signálu vyslaného z družíc aj signál odrazený od okolitých plôch a budov. Následne dochádza k interferenciám signálov a chybám v zpracovanom meraní. Veľkosť tejto chyby je závislá od troch veličín:

1. schopnosť antény eliminovať vplyv odrazených signálov,
2. odrazivosť povrchu v okolí merania,
3. výškou družíc nad horizontom.

### **3.5.5.Ďalšie faktory ovplyvňujúce kvalitu merania**

Medzi ďalšie faktory, ktoré vplývajú na kvalitu merania patria:

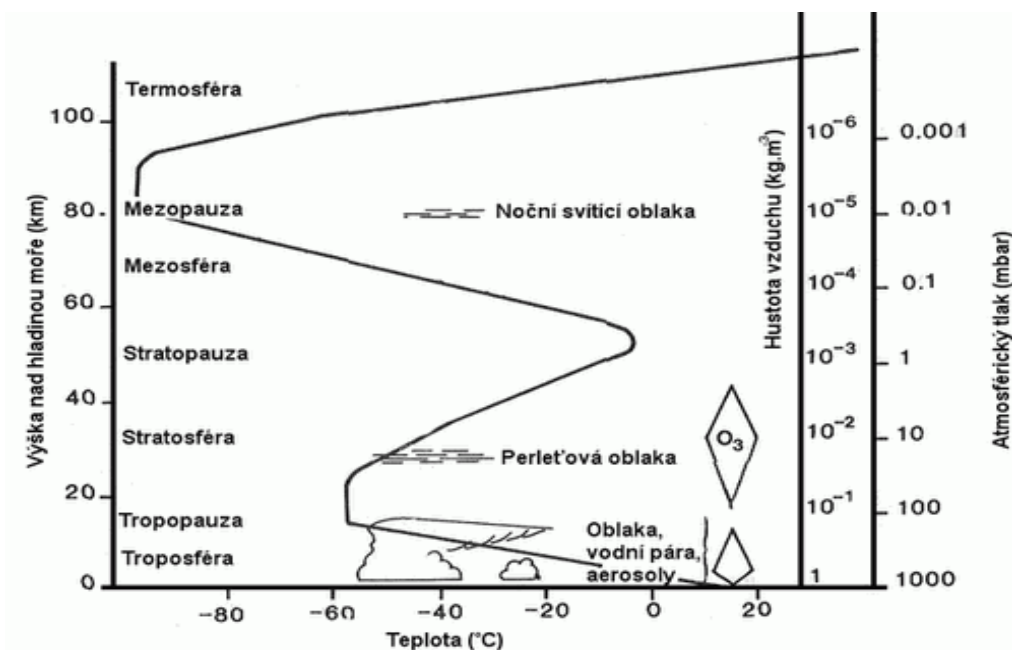
- počet a geometrické usporiadanie viditeľných družíc
- vplyv prílivu a odlivu takzvané slapové vplyvy Mesiaca
- pomer medzi signálom a šumom (pomer medzi užitočnými informáciami a šumom v signále)
- vplyv fázových centier prijímačov

## **4. GNSS meteorológia**

GNSS meteorológia je oblasť meteorológie, ktorej predmetom záujmu je získavanie informácií o stave atmosféry na základe veľmi presných GNSS meraní. V našom texte nás bude apriori zaujímať výpočet obsahu vodných pár v atmosfére. Pri uvedenom výpočte sa vychádza z oneskorenia družicových signálov šíriacich sa cez atmosféru, a to najmä cez jej najnižšiu vrstvu (troposféru).

### **4.1 Obsah vodných pár v atmosfére**

Obsah vodných pár v atmosfére označovaný ako PWV (Precipitable Water Vapour) je jeden z najdôležitejších ukazovateľov troposféry. Je základnou zložkou prenosu energie a zároveň je jedným zo základných činiteľov, ktoré ovplyvňujú počasie. Až 99 % vodných pár sa nachádza v troposfére, z toho 50 % obsahu vodných pár sa za štandardných atmosférických podmienok nachádza do výšky 1,5 kilometra nad zemským povrchom. Celkový obsah vodných pár v zemskej atmosfére je približne  $13 \cdot 10^{15}$  kg; toto množstvo predstavuje 100 000x menej vody ako sa nachádza v oceánoch. (Seidel, 2002)



Obrázok 1: Vertikálne členenie atmosféry

(<http://vydrab.troja.mff.cuni.cz>)

Obsah vodných pár v atmosfére je možné udávať v milimetroch. Dalo by sa povedať že ide o výšku vodného stĺpca, ktorý vznikol kondenzáciou všetkej vodnej pary nachádzajúcej sa nad daným miestom. Vo vnútrozemí strednej Európy sa pohybujú hodnoty obsahu vodných pár v rozmedzí od 5 do 40 mm. Obsah vodných pár je tiež často uvedený v podobe veličiny IWV (Integrated Water Vapour), ktorá je udávaná v jednotkách  $[\text{kg.m}^{-2}]$ . IWV vypočítame zo vzťahu:

$$\text{IWV} = \text{PWV}/1000 * \rho, \quad (4)$$

kde  $\rho$  je hustota vody  $[\text{kg.m}^{-3}]$  (pri  $10^\circ\text{C}$  999,7)

Obsah vodných pár na severnej pologuli je premenlivý v závislosti od ročného obdobia. Maximálny obsah vodných pár je dosiahnutý na prelome júla a augusta. V zimných mesiacoch množstvo vodných pár opäť klesá.

Obsah vodných pár v atmosfére je vysoko premenlivý parameter, a to v priestore i v čase. Táto priestorová a časová variabilita vedie k problémom s presnosťou pri numerických predpovediach počasia, najmä v predikcii oblačnosti a zrážok (Yong et al.,



2009).

## **4.2 Metódy získavania obsahu vodných pár v atmosfére**

Na určovanie obsahu vodných pár v atmosfére sa používa niekoľko metód, ktoré si bližšie popíšeme v nasledujúcich podkapitolách. V súčasnosti najpoužívanejšia metóda je za použitia meteorologickej rádiosondy.

### **4.2.1. Meteorologická rádiosonda**

Meteorologická rádiosonda býva upevnená na meteorologickom balóne, ktorý sa v Českej republike vypúšťa z dvoch miest a to Praha - Libuše (0:00, 6:00, 12:00, 18:00) a Prostějov (0:00, 12:00). Rádiosonda meria tlak, teplotu, relatívnu vlhkosť vzduchu, rýchlosť a smer vetra. Meteorologické hodnoty sú merané v päťsekundových intervaloch a pomocou vysielачa sa zasielajú na meteorologickú stanicu. Balón je schopný vystúpiť až do výšky 35 kilometrov rýchlosťou  $6 \text{ m.s}^{-1}$ ; za predpísanú hladinu, ktorú je potrebné dosiahnuť pre plnohodnotné výsledky merania sa považuje hranica tlaku vzduchu s hodnotou 100 hpa (tá sa nachádza vo výške približne 16 kilometrov). Po dosiahnutí maximálnej výšky balón z dôvodu rozpínania nosného plynu praskne a zariadenie rádiosondy sa následným dopadom na zemský povrch znehodnotí. Z toho dôvodu je pre každé meranie nevyhnutné vypúšťať novú sadu prístrojov; čo je ekonomicky náročné.

Medzi ďalšie nevýhody určovania obsahu vodných pár pomocou rádiosondy patrí malé časové a priestorové rozlíšenie. Na území Českej republiky je možno denne získať maximálne 6 výsledkov a len z dvoch miest. Posledná nevýhoda je spôsobená pohybom balóna vplyvom vetra, takže výsledný profil rozloženia vodných pár nie je kolmý nad stanicou.

Rádiosonda má však aj svoje výhody. Výhodou je najmä schopnosť určiť nielen obsah vodných pár vo vertikálnom reze nad stanicou ale aj ich konkrétne výškové rozloženie v jednotlivých častiach troposféry.

#### **4.2.2. Určovanie obsahu vodných pár pomocou družíc diaľkového prieskumu Zeme**

Družice určené na diaľkový prieskum Zeme nesú na svojej palube rádiometre, ktoré sú schopné na základe blízkeho infračerveného pásma elektromagnetického žiarenia (NIR) určiť obsah vodných pár v atmosfére. Medzi najčastejšie typy rádiometrov nesených meteorologickými družicami v rámci programov ESA (European Space Agency) a NASA (National Aeronautics and Space Administration) patria prístroje MODIS, MERIS, AVHRR. Ich nespornou výhodou je schopnosť určiť obsah vodných pár globálne nad celým územím, narozdiel od ostatných metód, kedy sa PWV určuje len pre malú oblasť. Uvedená metóda však za metódami GNSS merania a rádiosondami zaostáva so svojou presnosťou (Li et al., 2010). Ďalšou nevýhodou je tiež jej citlivosť na oblačnosť a možnosť merania len za denného svetla; rádiometer meria odrazené slnečné blízke infračervené žiarenie.

#### **4.2.3. Vysokofrekvenčný mikrovlnný rádiometer**

Pomocou vysokofrekvenčného mikrovlnného rádiometra je možné určovať šikmé aj vertikálne profily teploty vzduchu atmosféry, obsahu vodných pár a kvapalných častíc vody. Tieto veličiny určuje na základe merania vyžarovania atmosféry v mikrovlnnom pásme presnejšie v intervale frekvencií 22 – 59 GHz. V tomto pásme frekvencií (22,2GHz) sa nachádza v atmosfére rezonančná frekvencia vodnej pary, ktorá je závislá na tlaku, teda výške v ktorej sa vodná pára nachádza. (<http://oko.asu.cas.cz/pecny/wvradio.html>)

#### **4.2.4. Určovanie obsahu vodných pár na základe GNSS meraní**

Použitelnosť systému GPS pre účely určenia parametrov troposféry bola preukázaná už na počiatku deväťdesiatych rokov minulého storočia (Bevis et al. 1992). Určovanie obsahu vodných pár v atmosfére pomocou GNSS meraní vychádza z už spomínanej troposférickej refrakcie, pretože molekuly vody absorbujú a rozptyľujú signály šírené pomocou mikrovlnných a rádiových frekvencií. Meranie prebieha obvykle na referenčných

staniciach o presne známej polohe. Pri výpočte sa používajú presné efemeridy a korekcie hodín na družici. Na ich základe sa dá presne určiť čas potrebný pre šírenie signálu z družice na prijímač. Rozdiel skutočnej doby šírenia signálu s ideálnou dobou šírenia signálu vplyvom troposféry sa nazýva celkové oneskorenie signálu v zenitovom uhle (ZTD - Zenith Total Delay). Ďalej je potrebné, aby referenčná stanica mala vlastné meteorologické prístroje, pretože až na základe znalosti celkového oneskorenia signálu a tlaku vzduchu v dobe merania sme schopný vypočítať samotný obsah vodných pár (PWV). Štandardná hodnota ZTD spôsobená troposférou dosahuje približne 8ns (2,3 m) pre prijímač umiestnený v nulovej nadmorskej výške pri štandardných atmosférických podmienkach.

Prechod signálu družíc cez troposféru je ovplyvňovaný dvoma spôsobmi:

1. Signál sa ohýba pri prechode vrstiev o rôznom indexe troposférickej refrakcie. Takže signál od družice k prijímaču sa nešíri najkratšou vzdialenosťou ale po krivke.
2. Rádiové vlnenie sa šíri pomalšie pri prechode cez hustejšie prostredie ako pri prechode vákuom.

Súčet týchto dvoch javov by sa mal rovnať celkovému zenitovému oneskoreniu signálu. Analogicky je možné tieto dva javy priblížiť skúmanej problematike. Celkové zenitové oneskorenie sa rovná súčtu oneskorenia spôsobeného hydrostatickou zložkou vplyvu atmosféry (ZHD) a oneskorenia spôsobeného nehydrostatickou zložkou vplyvu atmosféry (ZWD). ZHD (zenith hydrostatic delay) je závislá najmä na atmosférickom tlaku vzduchu a ZWD (zenith wet delay), tzv. mokrá zložka oneskorenia je spôsobená samotnou vodnou parou. ZHD sa na celkovom oneskorení podieľa väčšou časťou a naopak ZWD menšou časťou.

$$ZTD = ZHD + ZWD$$

Výsledkom GNSS merania sú hodnoty celkového zenitového oneskorenia ZTD pre polohu referenčnej stanice a daný čas merania. Tieto hodnoty spoločne s údajmi o atmosférickom tlaku, teplote vzduchu nameranými na referenčnej stanici umožňujú vypočítať konkrétny obsah vodných pár v atmosfére (PWV).

Hodnotu obsahu vodných pár v atmosfére PWV [mm] možno pri znalosti ZWD vypočítať zo vzťahov:

$$PWV = \frac{\kappa * ZWD}{\rho} \quad (3)$$

$$\kappa = \frac{10^6}{(R/M_w) * [(c_3/T_m) + c_2 - (m * c_1)]} \quad (4)$$

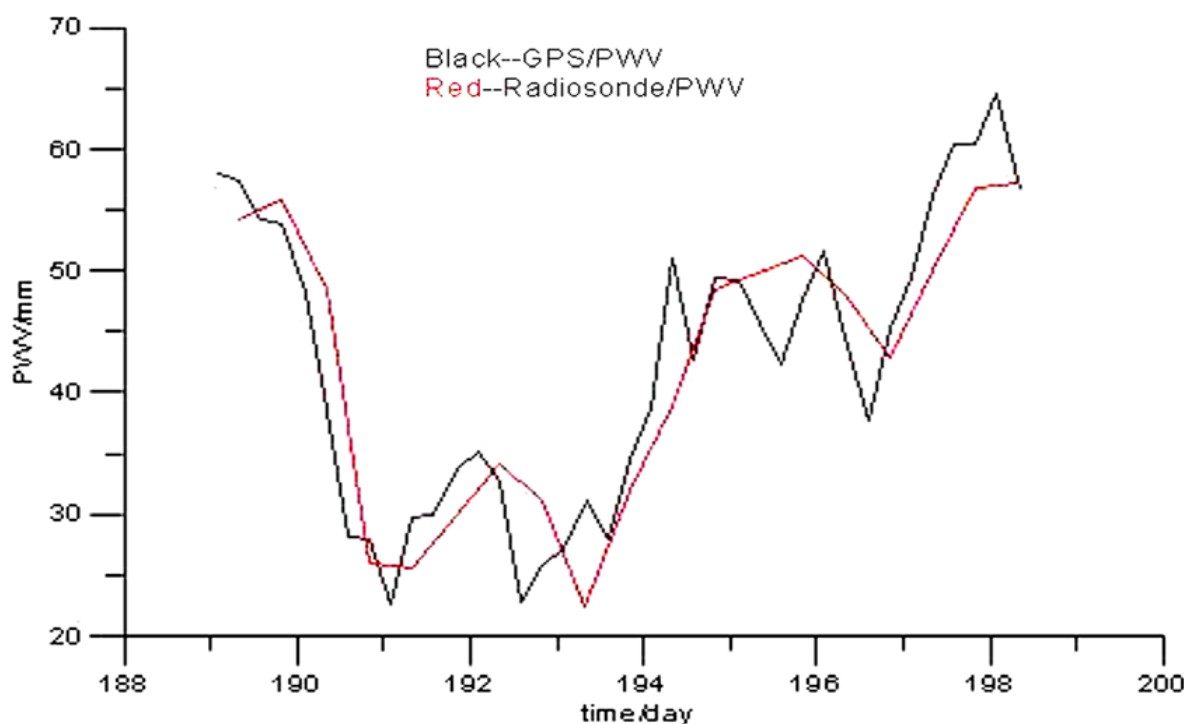
Jednotlivé veličiny použité v oboch vzťahoch sú uvedené a popísané v nasledujúcej tabuľke.

Koeficient	Vzťah / hodnota	Popis
$\rho$	$= 1\,000 \text{ [kg}\cdot\text{m}^{-3}\text{]}$	hustota vody
R	$= 287,1 \text{ [J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}\text{]}$	plynová konštanta
$M_w$	$= 18,0152 \cdot 10^{-3} \text{ [kg}\cdot\text{mol}^{-1}\text{]}$	molová hmotnosť vodnej páry
m	$= M_w / M_d = 0,62198$	pomer molových hmotností vodnej páry a vzduchu
$T_m$	$= 70,2 + 0,72 * T_s \text{ [K]}$	celková stredná teplota atmosféry, pričom $T_s$ je hodnota teploty vzduchu pri povrchu Zeme (nameraná na referenčnej stanici); tento vzťah je aproximačný, umožňuje určiť $\kappa$ s relatívnou chybou okolo 2%
$c_1$	$= 77,604 \pm 0,014 \text{ [K}\cdot\text{hPa}^{-1}\text{]}$	konštanta
$c_2$	$= 17 \pm 10 \text{ [K}\cdot\text{hPa}^{-1}\text{]}$	konštanta
$c_3$	$= (3,776 \pm 0,004) * 10^5 \text{ [K}^2\cdot\text{hPa}^{-1}\text{]}$	konštanta

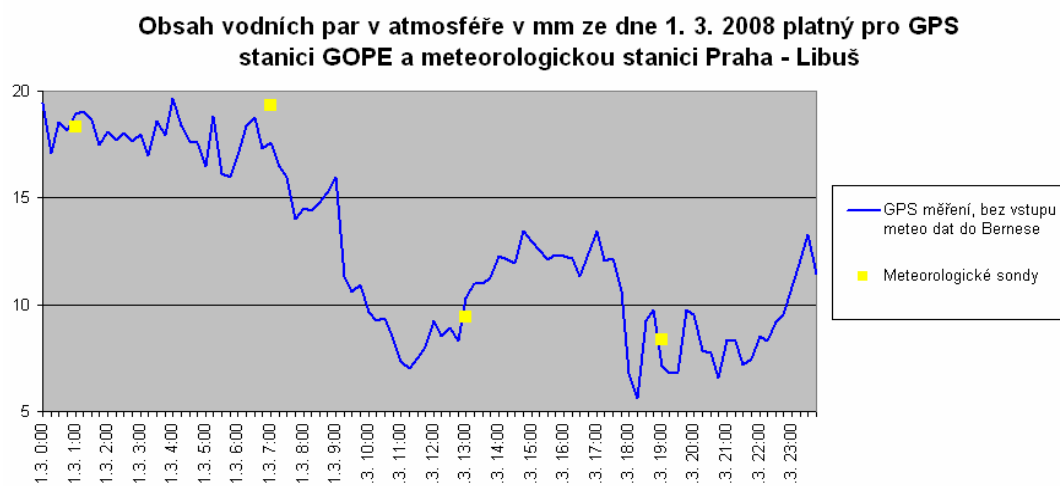
Tabuľka 2: Popis veličín použitých vo vzorcoch (3) (4) (Zhengdong, B. 2004)

Pri spracovaní meraní v hodinovom intervale zo siete tridsiatich referenčných staníc môžeme za deň získať až 720 hodnôt obsahu vodných pár. Z uvedeného kontextu vyplýva,

že GNSS poskytuje výrazne lepšie priestorové a časové rozlíšenie hodnôt obsahu vodných pár oproti rádi sondám. Ďalšou značnou výhodou GNSS meteorológie je schopnosť poskytovať kvalitné výsledky aj za veľmi nepriaznivých atmosférických podmienok ako sú búrky, víchrice a pod. Potvrdzujú to práce odborníkov v tejto oblasti (Liou A., Huang, 2000), (Song a Grejner-Brzezinska, 2009). Presnosť GNSS meraní je porovnateľná s presnosťou rádi sond (Yong, W., et al. 2006), (Kačmařík, M., 2009). Obrázky číslo 2 a 3 predstavujú ukážky porovnania hodnôt PWV získaných pomocou GNSS meraní a meteorologických rádi sond.



Obrázok 2: Porovnanie výsledkov PWV medzi GNSS meraním a rádi sondami (Yong, W., et al. 2006)



*Obrázok 3: Porovnanie výsledkov hodnôt vodných pár získaných metódou GNSS a rádi sondami (Kačmařík, M., 2009)*

Výstupy GNSS meteorológie môžu byť používané ako doplnkové vstupné dáta pre numerické predpovedné modely počasia. Takáto možnosť sa už v niektorých európskych krajinách využíva (napr. Veľká Británia, Francúzsko). Zahrnutie uvedených dát do modelov vedie všeobecne k miernemu spresneniu predpovedí zrážok (Kačmařík, 2012).

## **5. Automatizované spracovanie výpočtu obsahu vodných pár v atmosfére.**

Metódu založenú na GNSS meraniach je možné v praxi použiť len za predpokladu, že bude celý proces výpočtu obsahu vodných pár plne automatizovaný. Problematike automatizácie sa venuje celá nasledujúca kapitola. Samotný výpočet obsahu vodných pár v atmosfére sa skladá z dvoch veľkých častí:

1. Výpočet celkového zenitového oneskorenia ZTD
2. Samotný výpočet obsahu vodných pár PWV, ktorý vychádza zo znalosti ZTD a meteorologických veličín v mieste merania.

Prvá časť je spracovaná pomocou nameraných dát z referenčných staníc a vhodného programového prostriedku. V rámci tejto práce je používaný Bernese GPS SW, ktorý je vyvíjaný Astronomickým ústavom Univerzity v švajčiarskom Berne. V súčasnosti je distribuovaný vo verzii 5.2, v tejto práci je však používaná verzia 5.0.

### **5.1 *Dáta vstupujúce do automatizovaného spracovania***

Do spracovania dát pomocou programového prostriedku Bernese vstupuje mnoho dát, pričom základné dáta sú observačné RINEX súbory namerané na jednotlivých referenčných staniciach.

#### **5.1.1. RINEX súbory**

Názov RINEX je odvodený od pojmu Receiver Independent Exchange Format . Ide o štandardizovaný formát určený na výmenu dát nameraných GNSS prijímačmi. Všetky RINEX súbory musia dodržiavať určený formát zápisu a uloženia dát. Súbory sú nazývané podľa nasledujúceho kľúča:

**xxxxdddf.yyt**, kde

- xxxx predstavuje ID referenčnej stanice (napríklad VSBO),

- ddd predstavuje číslo GPS dňa,
- f znamená poradie súboru v rámci celého dňa (ak súbor obsahuje dáta pre celý deň, je na tomto mieste znak 0)
  - yy je posledná dvojčíslicie kalendárneho roku,
  - t predstavuje typ súboru (O sa používa pre observačnú správu, N pre navigačnú, M pre meteo správu, G pre Glonass navigačnú správu a H pre geostacionárnu GPS navigačnú správu).

V našom spracovaní sú používané observačné a meteo RINEX súbory. RINEX súbory bývajú ukladané v tzv. kompaktnom formáte, ten má navyše koncovku .Z. Tieto kompaktné súbory prostriedok Bernese nedokáže spracovať, z toho dôvodu je nutné do automatizácie zahrnúť ich dekomprimáciu.

### 5.1.2.Súbory typu \*.EPH

Jedná sa o formát obsahujúci v pätnásťminútových intervaloch presné efemeridy družíc, ktorý je tvorený pre každých 24 hodín. Pred jeho použitím v programe Bernese je nutné premenovať ho do podoby \*.PRE.

Všeobecný názov súboru:

**xxxwwwwd.EPH**, kde

- xxx predstavuje názov služby, ktorá ho vytvorila (IGS, COD...)
- wwww číslo GPS týždňa
- číslo dňa v týždni (0 predstavuje pondelok a 7 celý týždeň)

### 5.1.3.Súbory typu \*.ERP

Tieto súbory obsahujú informácie o Zemských póloch a sú vytvárané každý týždeň. Rovnako ako v prípade súborov .EPH je nevyhnutné pred spracovaním premenovať tento krát na \*.IEP Názov súboru je v tvare:

**xxxwwww7.ERP**, kde



- xxx predstavuje názov služby, ktorá ho vytvorila (IGS, COD...)
- www číslo GPS týždňa
- číslo 7 znamená, že sa jedná o týždenné riešenie

#### **5.1.4.Súbory typu \*.CLK**

Súbory typu \*.CLK obsahujú korekcie hodín na družiciach. Všeobecný tvar názvu je zhodný so súbormi typu \*.EPH

#### **5.1.5.Súbory typu \*.ION**

Tieto súbory nesú modelované informácie o vplyve ionosféry na šírenie GPS signálu pre každý deň. Všeobecnú štruktúru názvu majú rovnakú ako súbory typu \*.EPH (6.1.2)

## 6. Súčasný stav riešenia problematiky spracovania v blízkom reálnom čase

Aby bolo možné zapojiť hodnoty obsahu vodných pár z atmosféry získaných pomocou GNSS meraní do numerických predpovedných modelov, je pre praktické použitie nevyhnutné aby, boli tieto výsledky dostupné v čo najkratšom čase. Hodnoty získané za pomoci rádiosond sú dostupné už deväťdesiat minút po vypustení meteorologického balóna. V prípade vysokofrekvenčného rádiometra sú hodnoty dostupné po niekoľkých minútach. Na rýchlosť dodania výsledkov získaných pomocou GNSS meraní vplývajú najmä dva faktory:

1. rýchlosť poskytnutia nameraných dát z jednotlivých referenčných staníc siete do výpočtového strediska,
2. rýchlosť samotného spracovania.

Na európskom území vznikli spoluprácou geodetických a meteorologických inštitúcií tri na seba nadväzujúce projekty, ktorých hlavným cieľom bolo vytvoriť NRT (Near Real Time) spracovanie hodnôt ZTD/ PWV z existujúcich sietí referenčných staníc a úspešne zaviesť tieto dáta do operatívnej prevádzky európskych numerických predpovedných modelov. Jednalo sa o projekty COST-716 (1998 – 2003), TOUGH (2003 – 2006) a E-GVAP (2006 – 2009 2009 - 2013). Bližšie by sme sa venovali len poslednému menovanému – E-GVAP. Prvá fáza projektu E-GVAP pozostávala zo siete viac ako osemsto referenčných staníc s dobou dodania výsledkov do 105 minút. Druhá fáza projektu E-GVAP bola zahájená 1. 4. 2009 a jej úlohou bolo zaistiť stabilizáciu prevádzky celého systému a zvyšovanie kvality a rýchlosti dodávaných výsledkov (Kačmařík M., 2012). V súčasnosti projekt E-GVAP tvorí sieť viac ako tisícpäťsto referenčných staníc umiestených prevažne na území Európy. Výsledky z 50% staníc sú dostupné do 80 minút a z 90% staníc do 140 minút (<http://egvap.dmi.dk/>).

V rámci svetovo najväčšej siete GNSS referenčných staníc GEONET (GPS Earth Observing Network) v Japonsku bolo vytvorené spracovanie dodávajúc hodnoty ZTD v 30s intervaloch krátko po samotných observáciach. Systém je založený na kombinácii

techniky dvojitéch diferencií a PPP. Takýmto spôsobom sú najprv zo siete dvadsiatich troch staníc určené korekcie hodín na družiciach a následne sú použité pre PPP spracovanie. Obidva uvedené postupy využívajú predikované časti IGU produktov (Kačmařík M., 2012).

## **7. Zoznámenie sa s vytvoreným riešením takmer automatizovaného spracovania**

Vytvorené riešenie automatizácie výpočtu celkového zenitového oneskorenia signálu ZTD vytvorené Ing. Michalom Kačmaříkem, Ph.D. v rámci jeho dizertačnej práce (Kačmařík, 2012) malo niekoľko nedostatkov, ktoré bolo potreba odstrániť a riešenie tak skvalitniť.

Jedným z hlavných nedostatkov vytvorenej automatizácie bola skutočnosť, že bola automatizovaná iba prvá časť výpočtu, len výpočet celkového zenitového oneskorenia ZTD. Riešenie pozostávalo zo sedemnástich .bat súborov a troch skriptov v jazyku Python. Bat súbory aj skripty boli spúšťané pomocou plánovaných úloh systému Windows v presne definovanom poradí. Takéto riešenie nie je celkom optimálne. Ďalším nedostatkom riešenia boli chýbajúce opatrenia, napríklad v prípade, že by v daný okamih nebolo možné stiahnuť efemeridy alebo korekcie hodín. V takomto prípade by sa riešenie pre daný deň nepodarilo uskutočniť a automatizácia by sa k nemu už nevrátila. Ďalej pôvodné automatizované spracovanie neriešilo prechod medzi kalendárnymi rokmi. Prevod medzi rokmi musel byť uskutočnený manuálnym zásahom do jednotlivých .bat súborov.

Výsledky z automatizovaného spracovania celkového zenitového oneskorenia signálu (ZTD) bolo potrebné manuálne previesť na obsah vodných pár v atmosfére (PVW). Tento prevod bol riešený manuálnym procesom s využitím Microsoft Excel či pomocou skriptu v jazyku Python, do ktorého vstupujú hodnoty ZTD a meteorologické dáta. Autorom spomínaného skriptu Python je Ing. David Vojtek, Ph.D z Inštitútu geoinformatiky na VŠB-TUO.

Z dôvodu uvedených nedostatkov sme pristúpili k vytvoreniu nového automatizovaného spracovania.

## **8. Optimalizácia a realizácia novej automatizácie výpočtu obsahu vodných par v atmosfére**

Novovytvorená automatizácia uskutočňuje kompletne spracovanie za účelom získania hodnôt obsahu vodných pár v atmosfére pre vybranú sieť referenčných staníc. V automatizácii sú použité efemeridy typu rapid, ktoré sú dostupné už nasledujúci deň. V tomto prípade je podľa práce (Kačmařík, M., Skřivánková, P., 2011) rozdiel v presnosti spracovania s použitím efemeríd typu precise a rapid minimálny. V prípade použitia efemeríd typu rapid je možné dosiahnuť oveľa aktuálnejšie výsledky; v prípade použitia efemeríd typu precise nastáva markantný problém pri zahrnutí výsledkov do numerického meteorologického modelu. Z uvedeného textu vyplýva, že aktuálnosť je jedným z kľúčových faktorov pri využívaní nameraných hodnôt v praxi. V novovytvorenej automatizácii je tiež vyriešený prechod medzi kalendárnymi rokmi a to aj priestupnými. Ďalej je vyriešená situácia ak v dobe spustenia automatizovaného procesu nebude možné stiahnuť efemeridy, korekcie hodín či už z dôvodu výpadku servera alebo z dôvodu že súbory ešte nebudú dostupné. V takom prípade sa automatizované spracovanie pokúsi súbory stiahnuť opäť o hodinu. Ak sa ich nepodarí stiahnuť ani po piatich hodinách automatizácia sa preruší a užívateľ bude formou .log súboru informovaný o chybe, ktorá nastala.

Automatizácia pracuje pod operačným systémom Linux pomocou skriptu Bash.

Bash je interpret príkazového riadku a zároveň vysokoúrovňový programovací jazyk. Vo funkcii interpretov príkazov spúšťajú príkazy zapísané v príkazovom riadku. V prípade použitia ako programovacieho jazyka spracujú príkazy uložené v súboroch označovaných ako skripty. Rovnako ako u iných programovacích jazykov má Bash svoje premenné a príkazy pre riadenie toku.

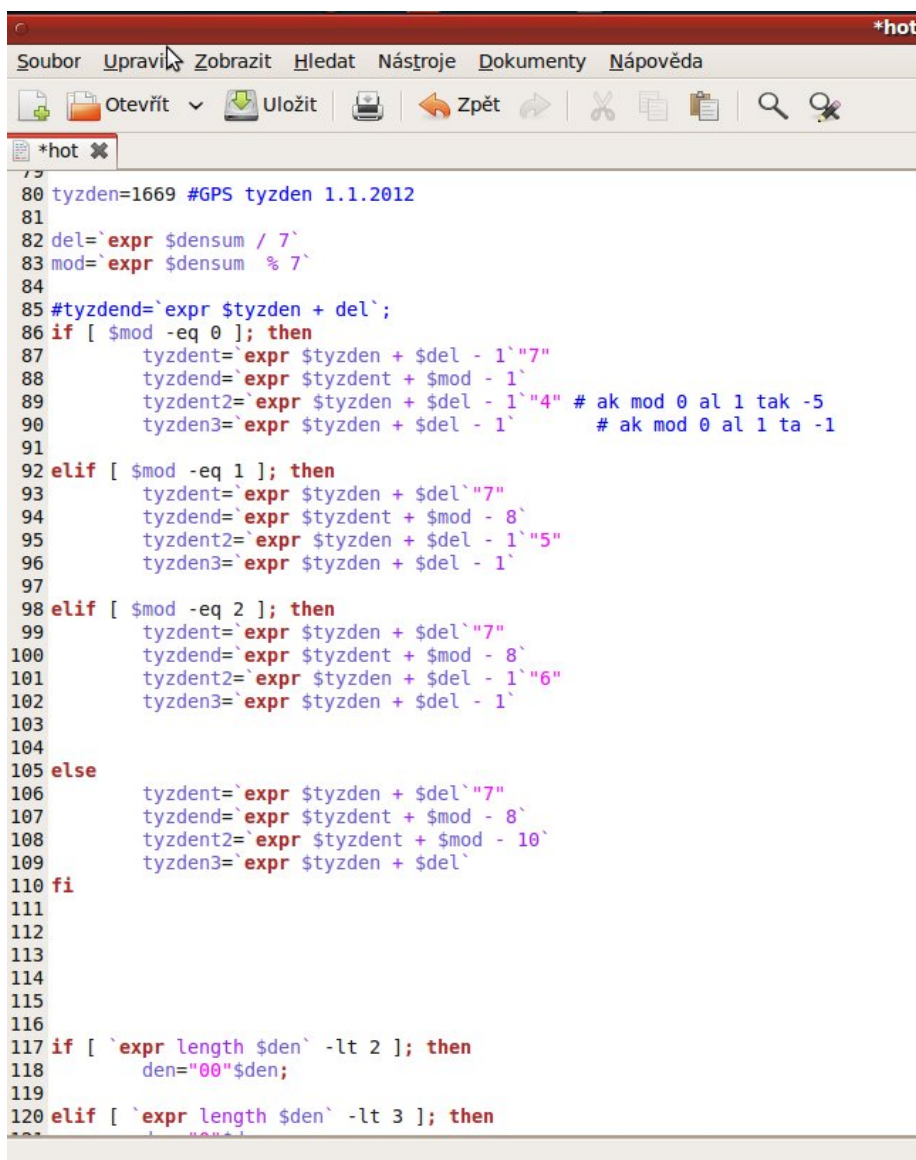
V našom automatizovanom spracovaní je práca so súbormi dôležitá, z toho dôvodu som si zvolil Bash, ktorý obsahuje výkonné nástroje na prácu so súbormi a adresármi. Jeho ďalšou výhodou je ľahká prenositeľnosť medzi Unixovými systémami.

Automatizácia sa môže spustiť v dvoch modoch:

V prvom mode prebieha automatické spracovanie pre včerajší deň. V druhom mode prebieha spracovanie pre konkrétne zadaný deň. V nasledujúcej podkapitole sa budeme bližšie venovať jednotlivým krokom automatizácie.

### **8.1.1.Jednotlivé kroky automatizácie**

Celkový proces automatizácie je započatý správnym určením dátumových formátov. V práci sa používajú dva druhy dátumových formátov v prvom prípade je to deň v roku zapisuje sa ako trojciferné číslo, druhý dátumový formát je GPS týždeň. Aktuálny deň v roku sa načíta zo systémového dátumu. Od načítaného dňa sa (s výnimkou začiatku roka) odčíta jeden deň aby spracovanie prebehlo pre včerajší deň. Následne je treba určiť hodnotu GPS týždňa a dňa. Prevod na GPS dátumový formát je riešený pomocou matematického vzťahu vychádzajúceho z hodnoty GPS týždňa pre dátum 1.1.2012. To umožňuje plynulý prechod medzi kalendárnymi rokmi bez ľudského zásahu.



```

80 tyzden=1669 #GPS tyzden 1.1.2012
81
82 del=`expr $densum / 7`
83 mod=`expr $densum % 7`
84
85 #tyzdend=`expr $tyzden + del`;
86 if [ $mod -eq 0 ]; then
87     tyzden=`expr $tyzden + $del - 1`"7"
88     tyzdend=`expr $tyzden + $mod - 1`
89     tyzden2=`expr $tyzden + $del - 1`"4" # ak mod 0 al 1 tak -5
90     tyzden3=`expr $tyzden + $del - 1`      # ak mod 0 al 1 ta -1
91
92 elif [ $mod -eq 1 ]; then
93     tyzden=`expr $tyzden + $del`"7"
94     tyzdend=`expr $tyzden + $mod - 8`
95     tyzden2=`expr $tyzden + $del - 1`"5"
96     tyzden3=`expr $tyzden + $del - 1`
97
98 elif [ $mod -eq 2 ]; then
99     tyzden=`expr $tyzden + $del`"7"
100    tyzdend=`expr $tyzden + $mod - 8`
101    tyzden2=`expr $tyzden + $del - 1`"6"
102    tyzden3=`expr $tyzden + $del - 1`
103
104
105 else
106     tyzden=`expr $tyzden + $del`"7"
107     tyzdend=`expr $tyzden + $mod - 8`
108     tyzden2=`expr $tyzden + $mod - 10`
109     tyzden3=`expr $tyzden + $del`
110 fi
111
112
113
114
115
116
117 if [ `expr length $den` -lt 2 ]; then
118     den="00"$den;
119
120 elif [ `expr length $den` -lt 3 ]; then

```

Obrázok 4: Ukážka prevodu dňa v roku na GPS týždeň

. Podľa dátumových formátov sú vstupné súbory ukladané na serveroch. Tieto súbory sa následne sťahujú a vstupujú do výpočtového procesu. Ďalej uvádzame stručnú osnovu automatizovaného riešenia.

1. Na základe určenia kalendárneho dátumu (väčšinou deň predchádzajúci tomu aktuálnemu) sa začne proces sťahovania súborov vstupujúcich do výpočtov. Väčšina RINEX súborov je na serveroch uložená v komprimovanom formáte. Aby bolo možné súbory zahrnúť do výpočtu, je v prvom rade nevyhnutné ich dekomprimovať.

2. Následne sa sťahujú efemeridy a korekcie hodín na družiciach
3. Niektoré súbory je potrebné premenovať do požadovanej podoby (napr. ERP na EPH,...).
4. Ďalej prebehne stiahnutie súboru \*.CRD obsahujúceho polohové súradnice referenčných staníc zaradených do európskej siete EUREF (<http://epncb.oma.be/>) platné pre danú týždennú epochu. Do tohto súboru sú doplnené dlhodobo platné súradnice ostatných referenčných staníc používaných v našom spracovaní, ktoré nie sú súčasťou EUREF.
5. Následne je treba prekonvertovať observačné RINEX súbory z ich natívneho formátu do formátu používaného systémovým prostriedkom Bernese. Na výstupe dostaneme pre každú referenčnú stanicu štyri súbory typu \*.CZH, \*.CZO, \*.PZH, \*.PZO
6. Všetky stiahnuté a pripravené súbory sa presunú na presné miesta adresárovej štruktúry. Adresárová štruktúra je vytvorená podľa požiadavky programového vybavenia Bernese 5.0
7. V tomto kroku sa spúšťa sieťové spracovanie programového prostriedku Bernese pod názvom rxn2snx\_pcs.pl. Táto úloha sa spúšťa s parametrami, ktoré sú odvodené odo dňa, pre ktorý má spracovanie prebehnúť. Na výstupe tohto spracovania sú súbory s hodnotami celkového zenitového oneskorenia pre jednotlivé referenčné stanice. Spracovanie prebieha s využitím techniky dvojitého diferenciál, hodnoty ZTD sú stanovované v 30 minútovom intervale.
8. Súbor s hodnotami ZTD a dostupné meteorologické dáta sú následne použité pre konverziu hodnôt ZTD na obsah vodných pár v atmosfére (PWV).
9. Na záver skript zmaže všetky stiahnuté súbory a skontroluje voľné miesto na disku. Ak klesne pod 200 MB, tak všetky vypočítané hodnoty obsahu vodných pár v atmosfére pre jednotlivé dni budú premiestnené na disk s väčšou kapacitou umiestnenom na externom počítači.



```

_SOURCE;TIME_DELTA;PRES;TEMP,HUMI;H;PRES_CORR;TD;TW;K;IWV;PWV
-16;938.3;-2.9;75.2;592.6455;938.3;2.13533763209;0.0594523679069;1.55343335574;0.0923552913842;9.24477391233
-16;938.1;-2.9;75.1;592.6455;938.1;2.13488248179;0.0577875182068;1.55343335574;0.0897690583278;8.9858917245
-16;937.9;-2.9;75.5;592.6455;937.9;2.13442733149;0.0575726685067;1.55343335574;0.0894353036372;8.95248284657
-16;937.7;-2.9;76.1;592.6455;937.7;2.13397218119;0.0584078188067;1.55343335574;0.0907326539702;9.08234774476
-16;937.6;-2.8;76.0;592.6455;937.6;2.13374460604;0.0587053939566;1.55386524332;0.0912202712647;9.13115828475
-16;937.2;-3.0;76.8;592.6455;937.2;2.13283430544;0.0589356945565;1.55300147342;0.0915272204832;9.16188393225
-16;936.9;-3.0;77.0;592.6455;936.9;2.13215157999;0.0592384200064;1.55300147342;0.0919973535529;9.20894429959
-16;936.6;-3.0;77.2;592.6455;936.6;2.13146885454;0.0595411454562;1.55300147342;0.0924674866226;9.25600466693
-16;936.1;-3.2;78.2;592.6455;936.1;2.13033097879;0.0597690212061;1.55213772458;0.0927697525751;9.28626151903
-16;935.9;-3.3;79.5;592.6455;935.9;2.12987582849;0.060964171506;1.55170585806;0.0945984620574;9.46931552126
-16;935.8;-3.3;80.1;592.6455;935.8;2.12964825334;0.0615817466559;1.55170585806;0.0955567570354;9.56524094448
-16;935.7;-3.2;79.8;592.6455;935.7;2.12942067819;0.0609393218059;1.55213772458;0.0945862202852;9.46809011864
-16;935.5;-3.1;80.0;592.6455;935.5;2.12896552789;0.0614344721058;1.55256959637;0.0953812935603;9.54767703307
-16;935.2;-2.6;78.3;592.6455;935.2;2.12828280244;0.0625171975557;1.55472903428;0.097197302182;9.72945967787
-16;935.0;-1.7;74.9;592.6455;935.0;2.12782765214;0.0625023478556;1.55861635428;0.0974171815486;9.75146962449
-16;935.1;-1.0;72.6;592.6455;935.1;2.12805522729;0.0622247727057;1.56164012031;0.097172701534;9.72699715056
-16;935.1;-0.3;70.6;592.6455;935.1;2.12805522729;0.0626647727057;1.56466414442;0.0980493229709;9.81474704414
-16;935.1;0.2;69.5;592.6455;935.1;2.12805522729;0.0622347727057;1.56682431968;0.0975109554051;9.76085639691
-16;934.5;0.8;68.9;592.6455;934.5;2.12668977639;0.0639302236054;1.56941670385;0.100333160807;10.0433594402
-16;934.4;1.1;66.4;592.6455;934.4;2.12646220124;0.0640377987554;1.57071296706;0.100585000887;10.0685686574

```

Obrázok 5: Ukážka výstupného súboru s hodnotami obsahu vodných pár. Posledný stĺpec predstavuje hodnoty PWV pre stanicu GOPE

## 8.1.2. Inštalácia na server

Záverečným krokom práce bola inštalácia programového vybavenia Bernese a uvedenie do činnosti novovytvorenej automatizácie na školskom serveri. Školský administrátor nám sprístupnil virtuálny počítač s operačným systémom Linux Ubuntu na adrese [gnssmeteo.vsb.cz](http://gnssmeteo.vsb.cz), na ktorý sme automatizáciu nainštalovali a sprevádzkovali. Vytvorený proces automatizácie sa každodenne spúšťa a beží od apríla 2013 v režime bez obsluhy.

## 9. Záver

V našej bakalárskej práci sme vytvorili plne automatizované riešenie získavania hodnôt obsahu vodných pár v atmosfére na základe práce, ktorá sa zaoberá GNNS meteorológiou. Prvotným cieľom našej práce bolo podať základné informácie o problematike GNNS meteorológie. V tomto bode sme sa snažili o komparáciu GNNS meteorológie s konvenčnými metódami získavania informácií o stave atmosféry.

V plynulej nadväznosti na problematiku GNNS meteorológie sme predstavili vytvorenie takmer automatizovaného riešenia. V tomto texte sme sa snažili poukázať na základné nedostatky takmer automatizovaného riešenia.

Tretím bodom našej práce bola finalizácia automatizovaného spracovania výpočtu obsahu vodných pár v atmosfére. V tejto kapitole sme sa pokúsili odstrániť nedostatky doterajšieho riešenia uvedeného problému: nesúvislosť jednotlivých .bat súborov, neefektívne spúšťanie pomocou plánovaných úloh, neošetrenie výnimok, neschopnosť plynulého prechodu medzi rokmi.

Po následnej analýze jednotlivých nedostatkov navrhnutého riešenia sme dospeli k záveru, že by bolo vhodnejšie vytvoriť celkom novú automatizáciu výpočtu hodnôt obsahu vodných pár v atmosfére. Záverečnú realizáciu tvorí len jediný skript. Novovytvorená automatizácia je aktívna na školskom virtuálnom serveri [gnsmeteo.vsb.cz](http://gnsmeteo.vsb.cz). Proces automatizácie sa každý deň automaticky spúšťa a výsledky obsahu vodných pár v atmosfére pre jednotlivé referenčné stanice sú ukladané na diskovom poli. Získané výsledky by bolo možné zapojiť do výpočtu numerických meteorologických modelov pokiaľ by bola dáta týmto spôsobom spracovávané v blízkom reálnom čase s hodinovým výstupom hodnôt ZTD. Toto rozšírenie automatizácie by mohlo byť ďalším krokom v práci na tejto téme.

## Zoznam ilustrácií

Obrázok 1: Vertikálne členenie atmosféry ( <a href="http://vydrab.troja.mff.cuni.cz">http://vydrab.troja.mff.cuni.cz</a> ).....	29
Obrázok 2: Porovnanie výsledkov PWV medzi GNSS meraním a rádiosondami (Yong, W., et al. 2006).....	34
Obrázok 3: Porovnanie výsledkov hodnôt vodných pár získaných metódou GNSS a rádiosondami (Kačmařík, M., 2009).....	35
Obrázok 4: Ukážka prevodu dňa v roku na GPS týždeň.....	41
Obrázok 5: Ukážka výstupného súboru s hodnotami obsahu vodných pár. Posledný stĺpec predstavuje hodnoty PWV pre stanicu GOPE .....	43

## Zoznam tabuliek

Tabuľka 1: Prehľad presnosti a dostupnosti jednotlivých druhov efemerid .....	25
Tabuľka 2: Popis veličín použitých vo vzorcoch (3) (4) (Zhengdong, B. 2004).....	33

## Zoznam použitej literatúry

- Bevis, M., Businger, S., Herring, T.A., Rocken, C., Anthes, R.A., Ware, R.H.: GPS meteorology – remote-sensing of atmospheric water-vapor using the global positioning system, *Journal of Geophysical Research - Atmospheres*, 1992
- Hrdina, Z., Pánek, P., Vejražka, F.: Rádiové určování polohy. (Družicový systém GPS), České Vysoké Učení Technické v Praze, 1996
- Kačmařík M.: Studium rozložení vodních parv atmosféře pomocí měření gnss, Disertační práce, Vysoká Škola Báňská - Technická Univerzita Ostrava, 2012
- Kačmařík, M.: Monitorování vývoje meteo situace nad ČR pomocí GPS meteorologie, Diplomová práce, Vysoká Škola Báňská - Technická Univerzita Ostrava, 2009
- Kačmařík, M., Skřivánková, P: Comparison of satellite orbit ephemerides for use in

GPSmeteorology ,*Advances in Space Research*, 48(2011), pp. 264-269, 2011

Liou Y.-A., Huang Ch.-Y.: GPS observations of PW during the passage of a typhoon, *Earth, planets and space* , vol. 52, pp. 709-712 , 2000

Rapant P.: Družicové polohové systémy, Vysoká Škola Báňská - Technická Univerzita Ostrava, 80-248-0124-8, 2002

Seidel, D. J. Water Vapor: Distribution and Trends. *The Earth System: Physical and Chemical Dimensions of Global Environmental Change*, John Wiley & Sons, Ltd, 2002

Song, D.-S., Grejner-Brzeninska, D: Remote sensing of atmospheric water vapor variation from GPS measurements during a severe weather event, *Earth, planets and space*, vol. 61, n. 10, pp. 1117-1125, 2009

Yong Wang, Yanping Liu, Lintao Liu, Zengzhang Guo, Xiaosan Ge, Houze Xu: Retrieval of the change of precipitable water vapor with zenith tropospheric delay in the Chinese mainland, *Advances in Space Research*, Volume 43, Issue I, 82-88 2009

Zhengdong, B.: Near-Real Time GPS Sensing of Atmospheric Water Vapour ,Queensland University of Technology, Australia,2004

## Internetové zdroje

<http://egvap.dmi.dk/>

[http://vydrab.troja.mff.cuni.cz/talnet/index.php?q=demo\\_meteorologie](http://vydrab.troja.mff.cuni.cz/talnet/index.php?q=demo_meteorologie)

[http://www.vugtk.cz/slovník/5891\\_referencni-stanice](http://www.vugtk.cz/slovník/5891_referencni-stanice)

[http://www.esa.int/Our\\_Activities/Navigation/The\\_future\\_-\\_Galileo/What\\_is\\_Galileo](http://www.esa.int/Our_Activities/Navigation/The_future_-_Galileo/What_is_Galileo)

<http://glonass-iac.ru/en/GLONASS/>

<http://tycho.usno.navy.mil/gpscurr.html>

<http://oko.asu.cas.cz/pecny/wvradio.htm>

## **Príloha**

Celý programový kód je umiestnený na priloženom CD nosiči.